第40卷 第5期
2023年10月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 40 No. 5
Oct. 2023

文章编号:1000-4939(2023)05-1164-07

面外压缩载荷下多层夹芯板的理论分析与数值研究

程曦,刘志芳,李世强

(太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所,030024 太原)

摘 要:采用理论分析与数值模拟相结合的方法对多层梯度夹芯板在面外压缩载荷作用下的变形规律与能量吸收性能进行了研究。基于超折叠单元理论,建立了单层、双层及三层梯形夹芯板平均压缩力(MCF)的理论分析模型。在此基础上,建立了多层梯形夹芯板的有限元模型,研究了面板厚度、芯层厚度及芯层底角对三层梯形夹芯板力学性能的影响。研究结果表明:理论预测与数值模拟结果吻合较好;三层梯形夹芯板中面板厚度对结构比吸能(SEA)的影响较小,芯层的厚度和底角影响较大。面板厚度由0.5 mm增加为1.0 mm,比吸能从10.93 J/g增加为10.98 J/g,而面板厚度变为1.5 mm时,比吸能减小为7.54 J/g。随着芯层厚度和底角的增加结构的比吸能增加,当芯层厚度由0.5 mm增加到1.5 mm时,比吸能变为原来的4.69倍;芯层底角为63°时结构的比吸能是底角为30°的4.29倍。

关键词:夹芯结构;理论预测;数值模拟;准静态压缩

中图分类号:O344.3 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.022

Theoretical analysis and numerical study of multilayer sandwich plates under out-of-plane compressive loading

CHENG Xi, LIU Zhifang, LI Shiqiang

(Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering,
Taiyuan University of Technology, 030024 Taiyuan, China)

Abstract: The method of combining theoretical analysis and numerical simulation is used to study the deformation law and energy absorption performance of multi-layer gradient sandwich panels under out-of-plane compressive loading. Based on the theory of super-folded elements, a theoretical analysis model of the mean compressive force (MCF) of single-layer, double-layer and three-layer trapezoidal sandwich panels was established. On this basis, a finite element model of the multilayer trapezoidal sandwich panel was established, and the influence of the thickness of the panel, the thickness of the core layer and the bottom angle of the core layer on the mechanical properties of the three-layer trapezoidal sandwich panel was studied. The research results show that the theoretical prediction is in good agreement with the

收稿日期: 2021-12-08 **修回日期**:2022-06-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11772216)
通信作者:刘志芳,副教授。E-mail:liuzhifang@tyut.edu.cn
引用格式:程曦,刘志芳,李世强. 面外压缩载荷下多层夹芯板的理论分析与数值研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1164-1170.
CHENG Xi, LIU Zhifang, LI Shiqiang. Theoretical analysis and numerical study of multilayer sandwich plates under out-of-plane compressive loading[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1164-1170.

numerical simulation results; the thickness of the panel in the three-layer trapezoidal sandwich panel has less influence on the specific energy absorption of the structure, and the thickness and bottom angle of the core layer have a greater influence. The panel thickness increases from 0.5 mm to 1.0 mm, the specific energy absorption increases from 10.93 J/g to 10.98 J/g, and when the panel thickness becomes 1.5 mm, the specific energy absorption decreases to 7.54 J/g. As the core layer thickness and bottom angle increase, the specific energy absorption of the structure increases. When the core layer thickness increases from 0.5 mm to 1.5 mm, the specific energy absorption becomes 4.69 times the original; when the core layer bottom angle is 63°. The energy absorption of the structure is 4.29 times that of the base angle of 30°.

Key words: sandwich structure; theoretical prediction; numerical simulation; quasi-static compression

夹芯板由于具有较高的比强度、比刚度及良好的能量吸收性能，作为能量吸收装置在民用和军事等领域有着广泛的应用。多年来，专家学者对夹芯板进行了大量研究[1-2]。

夹芯板芯层结构对夹芯板的力学性能有重要的影响。邓旭辉等[3]在冲击载荷下使用多物质流固耦合算法分析了方形蜂窝铝板的能量吸收性能，结果表明：随着面板厚度、核心高度的增加，蜂窝铝板在冲击荷载下的塑性变形减小，随着入射角度的增加，结构的破坏程度随之减小。BARTOLOZZI 等[4-5]研究了正弦波纹夹芯板的平面压缩行为。VALDEVIT 等[6]分析了具有波纹状和棱柱形金刚石芯层的多功能夹芯板，绘制了失效机制图，并将其性能与桁架和蜂窝夹芯板进行了比较，结果表明棱柱形拓扑结构的能量吸收性能最好。KILIÇASLAN 等[7]研究了梯形铝波纹芯夹层结构的轴向平面内压缩，观察到两种主要压缩模式：芯层渐进式折叠和夹层铝板折叠剪切式折叠。YAN 等[8]研究了三角形夹芯板的压缩特性，发现填充泡沫铝的三角形芯夹芯板的强度和能量吸收能力远大于无填充三角形夹芯板和单独的泡沫铝的强度和能量吸收能力。REJAB 等[9]对由铝合金和复合材料制成的三角形夹芯板的平面压缩进行了实验研究。RONG 等[10]利用数值模拟及实验的方法系统研究了不同芯层夹芯板（梯形、三角形、矩形、正弦及弧形）的能量吸收性能，建立了夹芯板的理论分析模型，预测了夹芯板的峰值力。

多层夹芯结构与单层夹芯结构相比，具有更好的刚度和强度[11]。江大志等[12]采用玻璃纤维增强环氧树脂复合材料层合板作为内、外面板，以 PVC 泡沫作为芯层材料，构造了双层夹芯复合材料结构。采用落锤冲击实验，得到了冲击过程的撞击力，发现双层夹芯结构比单层夹芯结构的力学性能更好。朱源等[13]使用理论分析和模拟的方式研究了冲击载荷下金属正交波纹夹芯结构的动态压缩响应，发现通过增加层数能够有效地增强结构的缓冲吸能能力，但层数超过 4 层以后增强效果不明显。HOU 等[14]对由梯形铝芯和铝合金薄板制成的不同配置，不同层数三角形夹芯结构进行了平面压缩和局部冲击，发现随着层数的增加，结构峰值力减小，平台期延长且结构能量吸收增加。CAO 等[15-16]对多层夹芯板进行研究，系统分析了低速及高速冲击下夹芯板能量吸收性能。

综上所述，研究者们已对压缩载荷作用下夹芯板的力学响应进行了大量的实验研究和有限元模拟，并建立了夹芯板的理论分析模型，然而，已有的理论分析主要集中于单层夹芯板，对多层夹芯板的研究较少，因此本研究对多层夹芯板在压缩载荷下的变形模式与吸能性能进行理论分析与数值模拟。本研究基于超折叠单元理论，建立单层、双层、三层梯形夹芯板在面外压缩载荷下平均压缩力（mean compressive force，MCF）的理论分析模型，并建立相对应的单层、双层、三层梯形夹芯板有限元模型，理论预测与有限元结果进行对比；分析面板厚度、芯层厚度及芯层底角等结构参数对三层梯形夹芯板变形模式和能量吸收性能的影响。

1　多层梯形夹芯板的理论预测

1.1　试件设计

梯形夹芯板由上、下面板与梯形芯层组成，其中面板长度 L_1，宽度 W_1 及厚度 t_1 分别为 80.5、50、1 mm；芯层长度 L_2，宽度 W_2 及高度 H 分别为 80.5、50、10 mm，芯层厚度 t_2 为 1 mm，底角 θ 为 63°，芯层

由5个单元组成,单层夹芯板结构示意图[15]如图1所示。

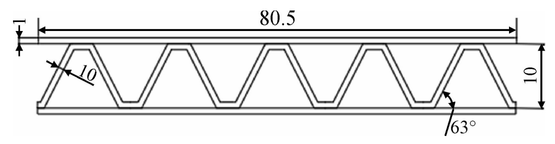


图1 单层夹芯板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-layer sandwich panel structure

1.2 理论分析

1.2.1 基础单元

夹芯板在面外压缩载荷下能量耗散主要分为两个部分:弯曲变形能和薄膜变形能[17-18],能量耗散(E_P)表达式为

$$E_p = E_b + E_m \tag{1}$$

其中:E_b为弯曲变形能;E_m为薄膜变形能。

结构的平均压缩力(P_m)为

$$P_m = \frac{E_p}{\Delta_d} \tag{2}$$

其中,Δ_d 为压缩距离。

结合夹芯板结构,弯曲变形能表达式为

$$E_b = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i M_0 W \tag{3}$$

其中:α 为结构变化角度;M_0为塑性弯矩;W 为夹芯板宽度。

当芯层结构为梯形结构时,芯层单元变形过程[15]如图2所示。



图2 梯形芯层单元变形过程

Fig. 2 Deformation process of trapezoidal core element

结构的变形形式可分为角形和"I"型,在塑性铰1~5处的弯曲变形能分别为

$$E_{1b} = E_{2b} = E_{4b} = E_{b1}^{117} = \frac{7}{20}\pi M_0 W \tag{4}$$

$$E_{3b} = E_b^{180} = \pi M_0 W \tag{5}$$

$$E_{5b} = E_{b2}^{117} = \frac{13}{20}\pi M_0 W \tag{6}$$

各芯层结构弯曲变形能如图3所示。其中:夹角为180°时定义为"I"型;其余角度定义为角型。

结构在变形过程中由于材料延展导致结构体积增加,增加的体积为该结构变形过程中产生的薄膜变形能。其中,"I"型单元薄膜变形能变形过程如图4所示,增加体积如图中黑色区域。

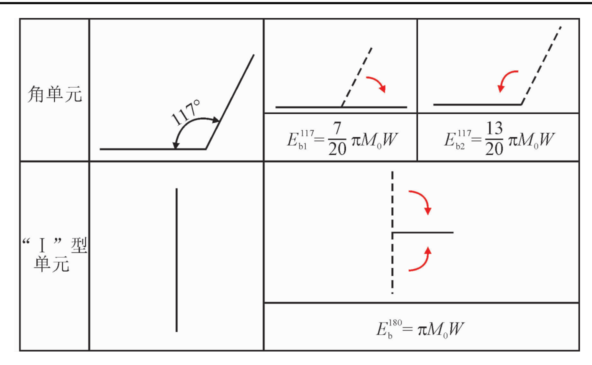


图3 各芯层结构弯曲变形能

Fig. 3 Bending deformation energy of each core structure

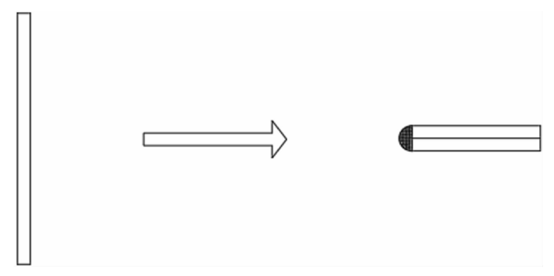


图4 "I"型结构薄膜变形能变形过程

Fig. 4 Membrane energy calculation models for I-shape

薄膜变形能表达式为

$$E_m = \sigma_0 \int_0^s W\mathrm{d}s \tag{7}$$

其中,σ_0为流动应力,且

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \tag{8}$$

其中,σ_y和σ_u分别为材料的屈服应力和极限应力。

当芯层结构为梯形结构时,在塑性铰1~5处的薄膜变形能分别为

$$E_{1m} = E_{2m} = E_{4m} = E_{m1}^{117} = \frac{7}{40}\pi\sigma_0 Wt^2 \tag{9}$$

$$E_{3m} = E_m^{180} = \frac{1}{2}\pi\sigma_0 Wt^2 \tag{10}$$

$$E_{5m} = E_{m2}^{117} = \frac{13}{40}\pi\sigma_0 Wt^2 \tag{11}$$

其中,t 为芯层厚度。

1.2.2 单层夹芯板的理论模型

单层梯形夹芯板在准静态压缩下能量耗散表达式为

$$E_p = 5 \times \left(\frac{27}{10}\pi M_0 W + \frac{27}{20}\pi\sigma_0 Wt^2\right) \tag{12}$$

1.2.3 双层夹芯板的理论模型

双层夹芯板由面板及芯层组成,夹芯板结构设计如图5所示。双层夹芯板在压缩过程中,芯层被压缩,且中间面板也发生了变形,其变形过程分为两个阶段:第一阶段,面板受压力变形;第二阶段,已变

形面板继续承受压力而变形直至被压平。根据模型变形模式，变形第一阶段中间面板变形情况如图 6 所示。

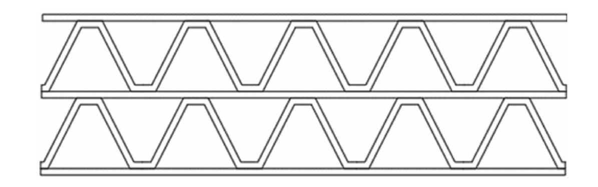


图 5　双层梯形夹芯板

Fig. 5　Double-layer trapezoidal sandwich panel

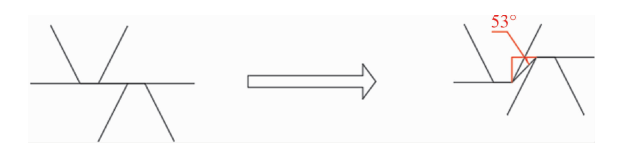


图 6　第一阶段中间面板变形过程

Fig. 6　The first stage of the middle panel deformation process

中间面板能量耗散表达式为

$$E_{\mathrm{p}}^{1} = 2 \times 10 \times \left(\frac{5}{17}\pi M\sigma_0 W + \frac{5}{34}\pi\sigma_0 Wt^2 \right) \tag{13}$$

双层夹芯结构的能量耗散表达式为

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{p}} &= 2 \times 5 \times \left(\frac{27}{10}\pi M_0 W + \frac{27}{20}\pi\sigma_0 Wt^2 \right) + E_{\mathrm{p}}^{1} = \\ &10 \times \left(\frac{27}{10}\pi M_0 W + \frac{27}{20}\pi\sigma_0 Wt^2 \right) + \\ &2 \times 10 \times \left(\frac{5}{17}\pi M_0 W + \frac{5}{34}\pi\sigma_0 Wt^2 \right) \end{aligned} \tag{14}$$

1.2.4　三层夹芯板的理论模型

三层夹芯板由上下面板、三层芯层及中间两个面板组成，如图 7 所示。由上节双层夹芯板结构分析可得，三层夹芯板的能量耗散表达式为

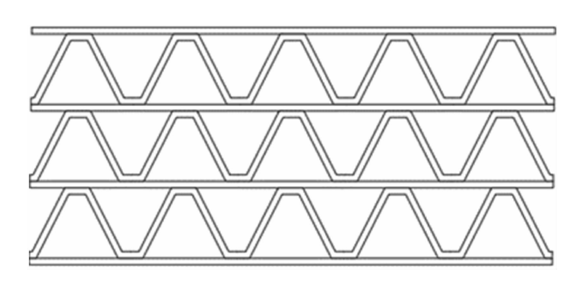


图 7　三层梯形夹芯板

Fig. 7　Three-layer trapezoidal sandwich panel

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{p}} &= 3 \times 5 \times \left(\frac{27}{10}\pi M_0 W + \frac{27}{20}\pi\sigma_0 Wt^2 \right) + 2 \times E_{\mathrm{p}}^{1} = \\ &15 \times \left(\frac{27}{10}\pi M_0 W + \frac{27}{20}\pi\sigma_0 Wt^2 \right) + \\ &40 \times \left(\frac{5}{17}\pi M_0 W + \frac{5}{34}\pi\sigma_0 Wt^2 \right) \end{aligned} \tag{15}$$

2　多层夹芯板的有限元分析

2.1　能量吸收指标

为了更好地评估夹芯板的能量吸收能力，分别使用能量吸收（E_{A}）、比吸能（SEA）和平均压缩力（P_{m}）三个评价指标。

能量吸收 E_{A} 为整个冲击过程中结构吸收的能量，即

$$E_{\mathrm{A}} = \int_0^s P\mathrm{d}s \tag{16}$$

其中：P 为瞬时载荷；s 定义为结构的有效变形位移。

比吸能 SEA 是衡量材料或结构能量吸收的重要参数，定义为结构有效变形位移内单位质量吸收的能量

$$E_{\mathrm{SEA}} = \frac{E_{\mathrm{A}}}{M} \tag{17}$$

其中，M 为夹芯板总质量。

平均压缩力 P_{m} 是指结构单位变形长度的能量吸收能力，即

$$P_{\mathrm{m}} = \frac{E_{\mathrm{A}}}{\Delta_{\mathrm{d}}} = \frac{1}{\Delta_{\mathrm{d}}}\int_0^{\Delta_{\mathrm{d}}} P\mathrm{d}\Delta \tag{18}$$

其中，P 为瞬时载荷。

2.2　夹芯板有限元模型

夹芯板有限元模型主要包括两部分：刚性板及夹芯结构。刚性板厚度为 2 mm，夹芯结构由上、下面板及芯层构成，上、下面板及芯层结构厚度均为 1 mm。图 8 为单层梯形夹芯板有限元模型。面板及刚性板采用 8 节点实体单元（C3D8R），芯层采用 4 节点线性缩减积分壳单元（S4R）[15]。上刚性板施加速度，下刚性板固定，夹芯结构芯层与面板之间采用绑定约束。材料采用铝合金 6061-T5，材料模型采用双线性弹塑性模型，参数如表 1 所示，其中，ρ 为密度，E 为杨氏模量，ν 为泊松比。图 9 为材料的真实应力应变曲线。

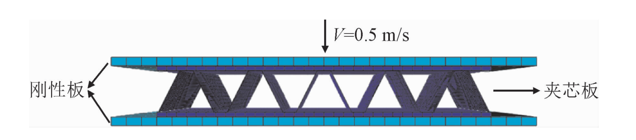


图 8　单层梯形夹芯板有限元模型

Fig. 8　Finite element model of single-layer trapezoidal sandwich panel

表1 铝合金6061-T5 材料参数

Tab. 1 Material parameters of 6061-T5 aluminum alloy

材料	$\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	E/GPa	ν	σ_y/MPa	σ_u/MPa
Al 6061-T5	2 700	72	0.33	187.0	264.2

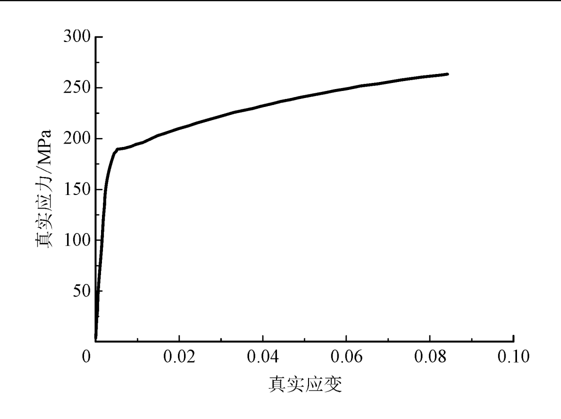


图9 铝合金6061-T5 真实应力应变曲线

Fig. 9 The true stress-strain curve of aluminum alloy 6061-T5

在使用有限元软件进行准静态分析时,要确保在模拟过程中结构动能要相对内能小得多。如图10所示,单层梯形夹芯板结构在压板速度为0.5 m/s时内能与总能量之比,从图中可看出能量比率在1附近且波动较小,所以计算时取压板速度$V=0.5$ m/s。

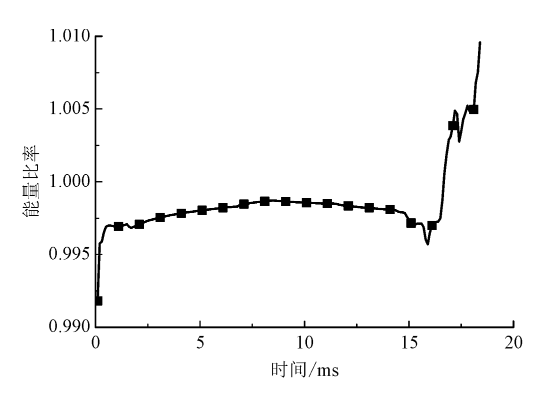


图10 有限元算法验证

Fig. 10 Finite element algorithm verification

经网格敏感性验证可知,单元网格长度$L=1$ mm时满足结构计算需要。假定夹芯结构与刚性板之间无摩擦。

2.3 结构参数对夹芯板影响

为研究面板厚度、芯层厚度与芯层底角对三层梯形夹芯板能量吸收性能的影响,设计了6种不同几何参数的三层梯形夹芯板有限元模型,详细结构尺寸如表2所示。

表2 有限元模型编号及参数

Tab. 2 FEM model numbers and parameters

模型编号	面板厚度/mm	芯层厚度/mm	芯层底角/(°)	面板及芯层长度/mm
SP-1	0.5	1	63	80.5
SP-2	1	1	63	80.5
SP-3	1.5	1	63	80.5
SP-4	1	0.5	63	80.5
SP-5	1	1	63	80.5
SP-6	1	1.5	63	80.5
SP-7	1	1	30	202.8
SP-8	1	1	45	129.6
SP-9	1	1	63	80.5

3 结果与分析

3.1 多层夹芯板理论预测与数值模拟结果

单层、双层及三层梯形夹芯板在准静态压缩下的有限元分析结果如图11所示,图中虚线表示夹芯板密实化位移取值点。可知单层、双层及三层梯形夹芯板变形过程类似,可分为弹性变形阶段、塑性变形阶段和密实化阶段。为了分析夹芯板的压缩行为,将密实化的位移取为夹芯板芯层高度的80%[15],表3中列出了不同层数梯形夹芯板平均压缩力的理论预测和数值模拟的结果。

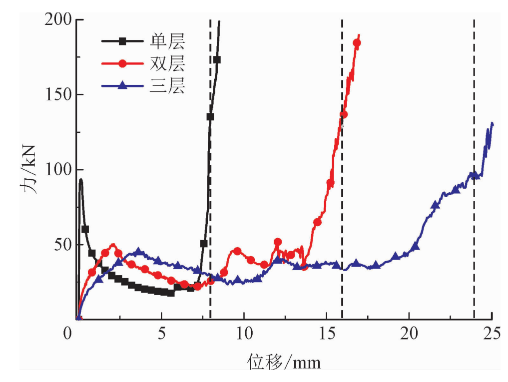


图11 多层梯形夹芯板力-位移曲线

Fig. 11 Force-displacement curve of multilayer trapezoidal sandwich panel

通过比较图11及表3中理论预测与数值模拟结果可知,单层梯形夹芯板的误差为13.04%;双层梯形夹芯板的误差为5.84%;三层梯形夹芯板的误差为0.33%。结构理论预测与数值模拟结果吻合较好。

表 3　多层梯形夹芯板数值模拟与理论预测结果

Tab. 3　Numerical simulation and theoretical prediction results of multilayer trapezoidal sandwich panels

层数	P_m理论值/kN	P_m模拟值/kN
单层	35.90	31.76
双层	43.70	41.29
三层	46.30	46.15

单层、双层和三层梯形夹芯板的平均压缩力随夹芯板层数的增加而增加。一方面，当夹芯板层数增加时，中间面板压缩变形吸收能量；另一方面，夹芯板芯层结构能量吸收效率远大于面板的能量吸收效率，当夹芯板层数增加时，芯层层数增加，故夹芯板能量吸收增加。

3.2　结构参数对夹芯板影响

图 12 给出了三层梯形夹芯板面板厚度、芯层厚度与芯层底角对夹芯板压缩行为的影响。由图 12(a)可知，当芯层厚度及芯层底角不变时，面板厚度对夹芯板整体结构力-位移曲线影响较小，压缩力随着面板厚度的增加而增大；由图 12(b)可知，当面板厚度及芯层底角不变时，芯层厚度对结构力-位移曲线影响显著，结构的压缩力随着芯层厚度的增加而增大；由图 12(c)可知，当面板厚度及芯层厚度不变时，改变芯层底角对结构力-位移曲线影响较小，压缩载荷随着底角的增大而增大。

表 4 列出了不同结构参数下，三层梯形夹芯板有限元模拟的能量吸收情况。

表 4　三层梯形夹芯板能量吸收

Tab. 4　Energy absorption of three-layer trapezoidal sandwich panel

影响因素		M/g	E_A/J	SEA/(J·g^{-1})	P_m/kN
面板厚度	0.5 mm	79.14	865.17	10.93	36.05
	1.0 mm	100.88	1107.67	10.98	46.15
	1.5 mm	122.61	924.70	7.54	38.53
芯层厚度	0.5 mm	72.17	258.55	3.58	10.77
	1.0 mm	100.88	1 107.67	10.98	46.15
	1.5 mm	129.58	2 175.81	16.79	90.66
芯层底角	30°	202.46	518.33	2.56	21.60
	45°	139.19	761.81	5.47	31.74
	63°	100.88	1 107.67	10.98	46.15

由图 12 及表 4 可知：三层梯形夹芯板中面板厚度对结构比吸能的影响较小，芯层的厚度和底角影响较大；面板厚度由 0.5 mm 增加为 1.0 mm，比吸能从 10.93 J/g 增加为 10.98 J/g，而面板厚度变为 1.5 mm时，比吸能减小为 7.54 J/g；随着芯层厚度和底角的增加结构的比吸能增加，当芯层厚度由 0.5 mm增加到 1.5 mm 时，比吸能变为原来的 4.69 倍，芯层底角为 63°时结构的比吸能是底角为 30°的 4.29 倍。

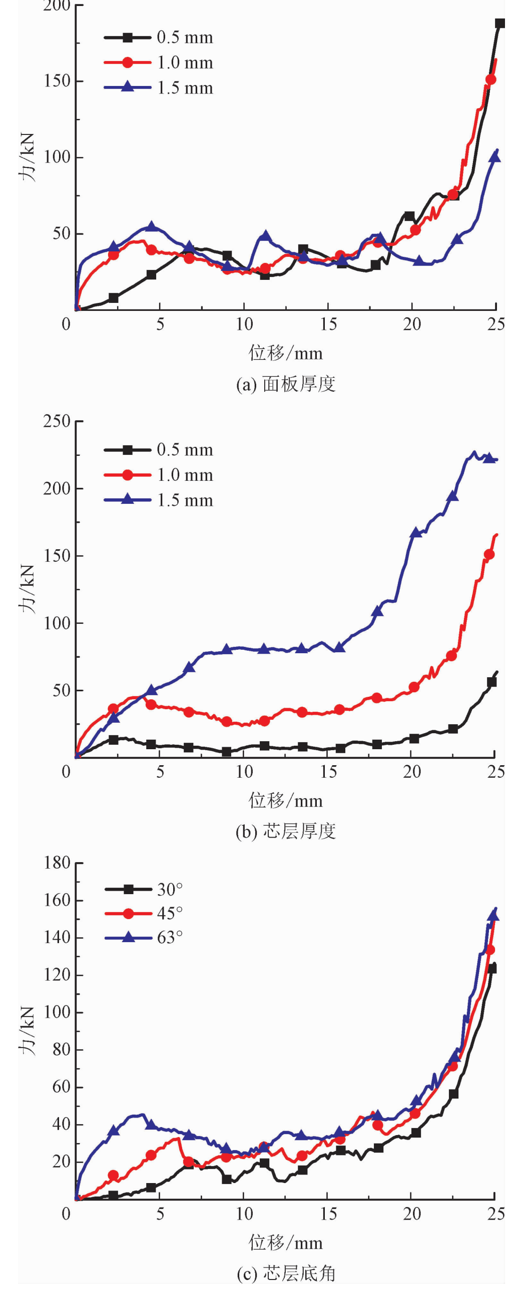


图 12　不同变量下夹芯板力-位移曲线

Fig. 12　Sandwich panel force-displacement curve under different variables

4 结 论

采用理论分析与数值模拟相结合的方法对多层梯度夹芯板在面外压缩载荷作用下的变形规律与能量吸收性能进行了研究。基于简化的超折叠单元理论建立了单层、双层和三层夹芯板平均压缩力的理论分析模型,通过数值模拟对其进行了验证;系统分析了多层梯度夹芯板在准静态压缩下面板厚度、芯层厚度及芯层底角等结构参数对其压缩变形行为和能量吸收性能的影响。得到如下结论。

1)多层梯度夹芯板在横向压缩载荷作用下的平均压缩力理论预测与数值模拟结果吻合较好。单层梯形夹芯板误差为13.04%;双层梯形夹芯板误差为5.84%;三层梯形夹芯板误差为0.33%。

2)单层、双层和三层梯形夹芯板的平均压缩力随夹芯板层数的增加而增加。

3)在本研究的研究范围内,芯层厚度及芯层底角不变时,增加面板厚度,夹芯板平均压缩力及比吸能先增大后减小;面板厚度及芯层底角不变时,增加芯层厚度,夹芯板比吸能及平均压缩力增加,比吸能;面板厚度及芯层厚度不变时,增大芯层底角,夹芯板平均压缩力及比吸能增大。

参考文献:

[1] 王洪欣,查晓雄,余敏,等.低速冲击下金属面夹芯板性能分析[J].振动与冲击,2014,33(10):81-86.
WANG Hongxin, ZHA Xiaoxiong, YU Min, et al. Impact resistance performance of metallic sandwich panels under low velocity impact [J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(10): 81-86(in Chinese).

[2] 肖先林,王长金,赵桂平.碳纤维复合材料-泡沫铝夹芯板的冲击响应[J].振动与冲击,2018,37(15):110-117.
XIAO Xianlin, WANG Changjin, ZHAO Guiping. Dynamic responses of carbon fiber composite sandwich panels with aluminum foam core subjected to impact loading [J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(15): 110-117(in Chinese).

[3] 邓旭辉,李亚斌,董琪,等.爆炸荷载作用下方形夹芯板动力学响应与优化设计数值分析[J].应用力学学报,2020,37(1):338-345.
DENG Xuhui, LI Yabin, DONG Qi, et al. Numerical analysis of dynamic response and optimization design of square sandwich panel under explosion load [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(1): 338-345(in Chinese).

[4] BARTOLOZZI G, BALDANZINI N, PIERINI M. Equivalent properties for corrugated cores of sandwich structures: A general analytical method[J]. Composite structures, 2014, 108: 736-746.

[5] BARTOLOZZI G, PIERINI M, ORRENIUS U, et al. An equivalent material formulation for sinusoidal corrugated cores of structural sandwich panels[J]. Composite structures, 2013, 100: 173-185.

[6] VALDEVIT L, HUTCHINSON J W, EVANS A G. Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores[J]. International journal of solids and structures, 2004, 41(18/19): 5105-5124.

[7] KILIÇASLAN C, GÜDEN M, ODACI Ī K, et al. Experimental and numerical studies on the quasi-static and dynamic crushing responses of multi-layer trapezoidal aluminum corrugated sandwiches[J]. Thin-walled structures, 2014, 78: 70-78.

[8] YAN L L, YU B, HAN B, et al. Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores[J]. Composites science and technology, 2013, 86: 142-148.

[9] REJAB M R M, CANTWELL W J. The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels[J]. Composites part B: Engineering, 2013, 47: 267-277.

[10] RONG Y, LIU J X, LUO W, et al. Effects of geometric configurations of corrugated cores on the local impact and planar compression of sandwich panels[J]. Composites part B: Engineering, 2018, 152: 324-335.

[11] LAKES R. Materials with structural hierarchy [J]. Nature, 1993, 361(6412): 511-515.

[12] 江大志,郭洋,李长亮,等.双层夹芯复合材料结构横向冲击响应实验[J].爆炸与冲击,2009,29(6):590-595.
JIANG Dazhi, GUO Yang, LI Changliang, et al. Experimental investigation on response of two-core sandwich composite structures under transverse impact [J]. Explosion and shock waves, 2009, 29(6): 590-595(in Chinese).

[13] 朱源,张建勋,秦庆华.金属正交波纹夹芯结构的动态压缩响应[J].爆炸与冲击,2020,40(1):51-62.
ZHU Yuan, ZHANG Jianxun, QIN Qinghua. Dynamic compressive response of metal orthogonal corrugated sandwich structure [J]. Explosion and shock waves, 2020, 40(1): 51-62(in Chinese).

[14] HOU S J, SHU C F, ZHAO S Y, et al. Experimental and numerical studies on multi-layered corrugated sandwich panels under crushing loading[J]. Composite structures, 2015, 126: 371-385.

[15] CAO B T, HOU B, LI Y L, et al. An experimental study on the impact behavior of multilayer sandwich with corrugated cores[J]. International journal of solids and structures, 2017, 109: 33-45.

[16] CAO B T, HOU B, ZHAO H, et al. On the influence of the property gradient on the impact behavior of graded multilayer sandwich with corrugated cores [J]. International journal of impact engineering, 2018, 113: 98-105.

[17] TRAN T N, HOU S J, HAN X, et al. Crushing analysis and numerical optimization of angle element structures under axial impact loading[J]. Composite structures, 2015, 119: 422-435.

[18] TRAN T N. Crushing analysis of multi-cell thin-walled rectangular and square tubes under lateral loading[J]. Composite structures, 2017, 160: 734-747.

(编辑 张璐)